

**Hochschule Fulda**

*University of Applied Sciences*



Fachbereich Pflege und Gesundheit

---

# **Kann künstliche Schwerkraft Bettruhe bedingten Muskelschwund an der Wade verringern?**

Modul PT19: Bachelor-Arbeit

Vorgelegt von:

Christiane Peggy Fischer

Matrikelnummer: 445884

Im Studiengang:

B.Sc. Physiotherapie

SS 2020

Referent: Prof. Dr. Udo Wolf

Coreferent: Prof. Dr. Jörn Rittweger

Fulda, 04.08.2020

## Abstract

**Introduction:** Long-term space flight shows lots of effects on the human body. For decreasing the consequences of microgravity centrifugation is used to lower muscle atrophy in cause of bed rest studys. This study focused on the effect of artificial gravity (AG) on the calf.

**Methods:** 24 subjects (16 males, 8 females) were included in the study with -6° head-down bed rest for 60 days. They were split into three groups. Two groups received centrifugation as artificial gravity whereas the third group was not treated with AG for countercheck reasons. The continuous group rotated 30 minutes per day and the interval group rotated five minutes with five minutes break for one hour on a short arm centrifuge. The muscle volume was analysed with an MRI (magnetic resonance imaging).

**Results:** 20 subjects finished the study. There was no significant difference between the both groups which received AG. AG resulted in significant changes to the M. Soleus ( $p = 0,000$ ) and the M. Gastrocnemius medialis ( $p = 0,005$ ) but not for M. gastrocnemius lateralis ( $p = 0,433$ ).

**Conclusion:** This study tried to examine the effect of artificial gravity in -6° head-down bed rest based on the change of muscle volume at the calf. Only two muscle showed an effect of adaption to the centrifugation.

**Keywords:** artificial gravity, space flight, bed rest study, microgravity, muscle atrophy

## Zusammenfassung

**Einleitung:** Ein Aufenthalt in Schwerelosigkeit hat vielfältige Auswirkungen auf den menschlichen Körper. Um die eintretenden Effekte von Schwerelosigkeit beobachten zu können, wurde Zentrifugation genutzt, um Muskelschwund an der Wade aufgrund von Bettruhe zu untersuchen.

**Methoden:** In der Studie wurden 24 gesunde Probanden und Probandinnen für 60 Tage in zwei Untersuchungsblöcken auf -6° zum Kopf hin geneigte Betten gelegt. Es erfolgte eine Aufteilung in drei verschiedene Gruppen. Die Probanden der Interventionsgruppe rotierten 30 Minuten ohne Unterbrechung auf einer Kurzarm-Zentrifuge mit 1 g. Die Testpersonen der Intervallgruppe wurden sechsmal fünf Minuten der Rotation ausgesetzt, die Pausen dazwischen betrugen ebenfalls fünf Minuten. Die Kontrollgruppe erfuhr keine Zentrifugation. Untersucht wurde die Änderung des Muskelvolumens anhand von MRT Bildern.

**Ergebnisse:** 20 von 24 Probanden haben die Studie beendet. Dabei wurde bei dem M. gastrocnemius medialis ( $p = 0,005$ ) und dem M. soleus ( $p = 0,000$ ) eine Wirksamkeit der Intervention durch die Kurzarm-Zentrifuge festgestellt, wohingegen bei dem M. gastrocnemius lateralis ( $p = 0,433$ ) keine signifikante Änderung sichtbar wurde.

**Schlussfolgerung:** Diese Arbeit hat die Auswirkungen von künstlicher Schwerkraft auf Bettruhe bedingten Muskelschwund an der Wade untersucht. Dabei konnte nur bei zwei von drei Muskeln signifikante Veränderungen des Volumens festgestellt werden.

**Schlüsselwörter:** Bettruhestudien, Mikrogravitation, künstliche Schwerkraft, Raumfahrt, Muskelschwund

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	4
1.2	Schwerkraft allgemein.....	5
1.2.1	Was bezeichnet Schwerkraft .....	5
5	1.2.2 Auswirkungen des Verlustes der Schwerkraft auf den Menschen.....	6
1.3	Terrestrische Modelle zur Simulation physiologischer Effekte der Schwerelosigkeit.....	7
1.3.1	Aktueller Forschungsstand .....	8
1.3.2	Die Zentrifugalkraft einer Kurzarm-Zentrifuge als Ersatz der Schwerkraft .....	8
10	1.4 Volumen und Funktionsverluste in der Wade durch Schwerelosigkeit und Bettruhe.....	9
2	Methoden .....	11
2.1	Das Design der AGBRESA Studie.....	11
2.2	Durchführung der MRT Messungen .....	13
15	2.3 Auswertung und Kontrolle der MRT Bilder .....	14
3	Ergebnisse .....	18
4	Diskussion.....	24
4.1	Interpretation der Ergebnisse .....	24
4.2	Limitationen der Studie .....	24
20	4.3 Ausblick .....	26
5	Schlussfolgerung .....	28
	Abbildungsverzeichnis.....	29
	Tabellenverzeichnis .....	30
	Abkürzungsverzeichnis .....	31
25	Literaturverzeichnis.....	32
	Anhang.....	34

# 1 Einleitung

Ein Aufenthalt in der Schwerelosigkeit stellt für die betroffenen Personen enorme Herausforderungen dar. Die sogenannte Mikrogravitation hat Auswirkungen auf den gesamten Körper und Bewegungsapparat. Beispiele dafür sind Knochenabbau und Muskelschwund sowie eine Schwächung des Herz-Kreislaufsystems [1]. Um die eintretenden Effekte von Schwerelosigkeit und körperlicher Inaktivität genauer untersuchen zu können, werden Bettruhestudien in einem um  $-6^\circ$  zum Kopf hin geneigtem Bett durchgeführt [1, 2]. Inzwischen haben sich verschiedene Interventionen wie Widerstandstraining [3] und Ganzkörper-Vibrationsstimulation [4] als effektive Maßnahme etabliert, um die Folgen der Schwerelosigkeit auf den Körper zu verringern. Des Weiteren nutzen die Astronauten auf der International Space Station (ISS) vorhandene Trainingsgeräte wie Laufband, Fahrradergometer und Krafttrainingsgeräte, um ihre Muskelmasse und Bewegungsmotorik zu erhalten [5]. Diese Maßnahmen können derzeit die Auswirkungen von Mikrogravitation zwar verringern, sind jedoch sehr zeitaufwendig. Ein Astronaut trainiert im Durchschnitt 1,5 Stunden pro Tag und benötigt zusätzlich eine Stunde für den Auf- und Abbau der Geräte [6]. Es wird an verschiedenen Systemen geforscht, um die gesundheitlichen Folgen eines Aufenthalts in Schwerelosigkeit so gering wie möglich zu halten. Eine Möglichkeit die Auswirkungen von Mikrogravitation zu verringern besteht darin, die fehlende Schwerkraft durch die Zentrifugalkraft auf einer Kurzarm-Zentrifuge zu ersetzen. Die Zentrifugalkraft wird dabei als sogenannte künstliche Schwerkraft bezeichnet. Ein solches System stellt die Kurzarm-Zentrifuge des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln dar. Darin können Probanden entlang ihrer Körperlängsachse in radialer Richtung platziert und in Richtung der Füße beschleunigt werden. Dadurch lässt sich künstliche Schwerkraft in Form von G-Kräften simulieren [7]. Die entstehenden Effekte und ihre Auswirkungen auf den Menschen wurden im Jahr 2019 in der *Artificial Gravity Bedrest study (AGBRESA) Zentrifugation – eine vielversprechende Maßnahme gegen Effekte der Langzeitbettruhe* des DLR in Köln in Kooperation mit der European Space Agency (ESA) und der National Aeronautics and Space Administration (NASA) untersucht. Ziel dieser Studie war der Vergleich der Auswirkungen zwischen einer Interventionsgruppe, welche täglich 30 Minuten auf der Kurzarm-Zentrifuge rotiert und einer Intervallgruppe, die jeden Tag sechs mal fünf Minuten mit jeweils fünf Minuten Pause rotiert [8]. Diese zwei Gruppen wurden anschließend mit der Kontrollgruppe verglichen, welche keiner künstlichen Schwerkraft ausgesetzt wurde. Dabei wurden neben den Interventionen verschiedene Untersuchungen durchgeführt, um die Risiken zu überwachen und die Folgen künstlicher Schwerkraft zu analysieren. Mit einem Zeitraum von insgesamt 89 Tagen

Aufenthaltsdauer für die Probanden ist diese Studie die momentan Größte, die sich mit den Auswirkungen von Zentrifugation auf den menschlichen Körper beschäftigt.

Anteilig an den Untersuchungen der AGBRESA befasst sich die vorliegende Arbeit ausschließlich mit den Auswirkungen auf das Muskelsystem der Wade. Studienrelevant

5 sind diese Forschungen, da bereits in früheren Untersuchungen eine besonders starke Atrophie der Muskeln M. gastrocnemius medialis, M. gastrocnemius lateralis und dem M. soleus nach Aufenthalt in der Schwerelosigkeit aufgezeigt wurden [9]. Dadurch weisen die Astronauten nach der Rückkehr auf die Erde kein gesundes Bewegungsmuster im Gang auf und Fortbewegung aus eigener Kraft ist teilweise nicht möglich [10]. Somit ist die  
10 Antwort auf die folgende Fragestellung: „Kann künstliche Schwerkraft Bettruhe bedingten Muskelschwund an der Wade verringern?“, von wissenschaftlicher Relevanz. Dafür werden die Werte vor Beginn der Bettruhe und kurz nach Beendigung dieser von der Kontroll-, Intervall- und Interventionsgruppe verglichen. Zur Überprüfung der Ergebnisse wurde die H1 Hypothese „Künstliche Schwerkraft erzeugt durch die Kurzarm-Zentrifuge verringert  
15 Bettruhe bedingten Muskelschwund an der Wade“ formuliert.

## 1.2 Schwerkraft allgemein

Um die Forschung auf diesem Gebiet besser verstehen zu können, ist es notwendig die physikalischen Grundlagen der Schwerkraft zu erläutern. Weiterhin werden deren Auswirkungen auf den Menschen und die Veränderungen des Körpers unter Einfluss von  
20 Mikrogravitation erklärt.

### 1.2.1 Was bezeichnet Schwerkraft

Im Gravitationsgesetz wird die Schwerkraft als gegenseitige Anziehung zweier Massen beschrieben [11]. Dabei gilt folgender Zusammenhang:  $F = \frac{G \times m_1 \times m_2}{r^2}$ , wobei  $m_1$  die Masse des angezogenen und  $m_2$  die des anziehenden Körpers beschreibt. Diese beiden  
25 Werte sind proportional zueinander und werden mit der Gravitationskonstante  $G$  multipliziert. Das  $r^2$  bezeichnet den quadrierten Abstand zwischen den Massen  $m_1$  und  $m_2$ . Mit Hilfe der Gleichung kann eine Erdanziehungskraft von ca. 9,81 m/s<sup>2</sup> auf Meereshöhe ermittelt werden, welche 1 g entspricht und unseren Normalzustand definiert [11]. Die Erdanziehungskraft ist ein bedeutender Einflussfaktor für die Evolution und die funktionelle  
30 Entwicklung des Menschen [12].

### 1.2.2 Auswirkungen des Verlustes der Schwerkraft auf den Menschen

Durch die Abwesenheit der Schwerkraft kommt es zu verschiedenen physiologischen Auswirkungen auf den menschlichen Körper [12]. Das Fehlen des gravitationsabhängigen Anteils des hydrostatischen Druckes am zentralen und peripheren Blutdruck führt zu neuronal und hormonal gesteuerten Anpassungen des Herz-Kreislaufsystems und kann als akute Nebenwirkung unter anderem zu Kopfschmerzen, geschwollenen Nasengängen sowie zu einem Verlust von Muskel und Knochenmasse führen [12, 14]. Die fehlende Sedimentation bewirkt, dass sich die Wirksamkeit von Medikamenten verringert und Diagnostiktests auf Lipidbasis nicht mehr ansprechen. Die Abwesenheit von Konvektion führt zu Einflüssen auf den Wärmehaushalt des Körpers. Dies äußert sich in Form von Schwitzen und Empfindungsstörungen der Temperatur in den Extremitäten. Diese physiologischen Veränderungen können diverse Gesundheitsrisiken wie Infektionen, Nierensteine, Verletzungen am Muskel- und Knochengewebe sowie metabolische Syndrome verursachen [12]. Auf der ISS besitzt die Schwerkraft das 0,0001-fache des Wertes auf der Erde. Folglich kommt es zu einer Atrophie des Bewegungsapparates durch fehlende Belastung in der Schwerelosigkeit. Die Effekte, welche sich auf die Muskulatur auswirken, sind ein Verlust an Muskelstärke, -masse und -tonus [5]. Weiterhin verringern sich die aeroben Kapazitäten der Personen, wodurch der Nährstofftransport in die Muskeln und damit der Aufbau von Muskelmasse erschwert und der Abbau erleichtert wird. Diese Effekte sind zusätzlich von den individuellen Gegebenheiten jeder Person abhängig. Die genauen Auswirkungen, welche der Verlust von Schwerkraft auf den Muskel hat, sind bis heute nicht vollständig geklärt. Dabei gibt es mehrere Mechanismen, welche berücksichtigt werden müssen. Die Mikrogravitation bewirkt eine Verlagerung der Flüssigkeiten aus den Extremitäten in die Körpermitte, was die Versorgung der Muskulatur erschwert. Daher kommt es zu einem Rückgang der Skelettmuskulatur in Funktion und Größe sobald die Menschen sich für längere Zeit in Schwerelosigkeit aufhalten [12]. Aufgrund der Erdanziehungskraft wurde der menschliche Organismus gezwungen sich den wirkenden Kräften anzupassen, um Fortbewegung gewährleisten zu können. In diesem Zusammenhang kommen zahlreiche komplexe physikalische und biochemische Netzwerke im Körper zum Tragen, welche Auswirkungen auf Muskel und Knochen haben [15]. Mechanische Reize wie Dehnung oder Kompression sowie Kräfte durch das Passieren von Flüssigkeiten stimulieren den Knochen. Darauf reagiert der Körper, indem er die eigene Versorgung mit den Osteozyten steigert und somit einen Knochenaufbau initiiert [16]. Ebenfalls wird die muskuläre Versorgung erhöht, um eine Anpassung an die Umwelt gewährleisten zu können. Durch den mechanischen Stress wird eine analoge molekulare Antwort generiert, welche einen Umbau im Körper einleitet. Dieser Mechanismus wurde

bereits früher als Wolff's Law form follows function beschrieben [17]. Diese physikalischen Mechanismen bedingen eine dauerhafte Anpassung unseres Organismus an die Umwelt. Auf den Muskel bezogen bedeutet das, dass es durch fehlende Nutzung zu einer Atrophie inklusive Veränderungen in der Eiweißstruktur kommt. Studien haben belegt, dass die Verringerung des Volumens hauptsächlich durch eine Reduktion der Querschnittsfläche und weniger durch eine Verkürzung erfolgt [5]. Grund für die Volumenreduktion ist eine reduzierte Proteinbiosynthese während eines erhöhten Proteinabbaus. In Folge dessen kann bereits ein Aufenthalt von drei Monaten im Weltraum zu einer um 15% herabgesetzten Proteinbiosynthese führen [18]. In diesem Kontext wurde der Schwerpunkt von Forschungen auf die verschiedenen Muskelfasertypen gelegt. Es stellte sich heraus, dass die schnellen Typ-II-Fasern stärker als die langsamen Typ-I-Fasern atrophieren [19].

### **1.3 Terrestrische Modelle zur Simulation physiologischer Effekte der Schwerelosigkeit**

Einige Effekte der Schwerelosigkeit auf den menschlichen Körper können auf der Erde durch langzeitige, permanente Bettruhe untersucht werden [12]. Mit Hilfe von horizontalen oder um  $-4^\circ$  bis  $-6^\circ$  Richtung Kopf geneigten Betten mit oder ohne Immobilisation der Probanden sowie der Anwendung von Dry Immersion wird versucht einen Aufenthalt in Schwerelosigkeit nachzustellen. Bei der Dry Immersion handelt es sich um ein Modell, bei dem sich die Probanden in ein Wasser gefülltes Becken, ähnlich einer großen Badewanne, begeben und dort über einen längeren Zeitraum aufhalten [20]. Die Probanden bleiben dabei trocken, da sie durch eine Folie vom Wasser getrennt werden. Diese Variante zeigt die eintretenden Folgen am realistischsten, wird jedoch International nicht für längere Simulationen von Schwerelosigkeit verwendet. Probleme in Langzeitstudien können bei dieser Intervention vor allem im Bereich der Hautventilation und Hygiene auftreten. Als Alternative wird in der heutigen Forschung vorzugsweise die Lagerung im Bett mit einem um  $-6^\circ$  geneigtem Kopfteil angewendet. Unter Anwendung dieser Methode konnten nachweislich die Auswirkungen der Schwerkraft um bis zu 83% reduziert werden [12]. Ein weiterer Vorteil ist deutlich mehr Probanden als zur Verfügung stehende Astronauten untersuchen zu können. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass mehrere Untersuchungen an den Probanden vorgenommen werden können und eine bessere Überwachung dieser gewährleistet ist. Zusätzlich sind keine platzbedingten Beschränkungen für Geräte gegeben, welche auf den Raumstationen oft eine Begrenzung darstellen.

### 1.3.1 Aktueller Forschungsstand

Eine Variante um Muskelatrophie zu verhindern, ist es die Erdanziehungskraft ganz oder teilweise durch andere Kräfte zu ersetzen. Die derzeitigen Maßnahmen gegen Schwerelosigkeitseffekte sind zum jetzigen Zeitpunkt nicht fortschrittlich genug, um dem Menschen einen Aufenthalt im Weltraum ohne gesundheitliche Risiken zu gewährleisten. Daher liegt der Fokus von Studien darauf, die Folgen durch einen Aufenthalt in Schwerelosigkeit aufgrund verbesserter Maßnahmen so gering wie möglich zu halten. Um den vorhandenen aktuellen Forschungsstand darstellen zu können, ist es wichtig sich einen Überblick über die verschiedenen Systeme zu schaffen, welche künstliche Schwerkraft und deren Auswirkungen simulieren können [12].

Das Training an Bord der ISS erfolgt mit unterschiedlichen Hilfsmitteln wie einem Laufband, der ARED (Advanced Resistance Exercise Device) Maschine für aktives Widerstandstraining und einem Pinguinanzug für die Tonisierung der unteren Extremitäten. Des Weiteren werden verschiedene Anzüge wie der Chibis Suit und der G-Suit genutzt, um die Volumen- und Druckverteilung im Körper zu regulieren. Als weitere Technik wird Elektrostimulation verwendet, um Muskelgruppen zu aktivieren und so eine Atrophie zu verhindern. Dabei konnte bereits 1996 in Bettruhestudien ein Erfolg verzeichnet werden [21]. Weiterhin wird an der Wirkung von Vibrationsstimulation am ganzen Körper geforscht [22]. Ziel ist es in diesem Zusammenhang die fehlende Stoßbelastung der Muskulatur durch die Abwesenheit von Schwerkraft auszugleichen. Die verschiedenen genannten Systeme werden von den Astronauten in Kombination angewendet.

### 1.3.2 Die Zentrifugalkraft einer Kurzarm-Zentrifuge als Ersatz der Schwerkraft

Die Humanzentrifuge stellt eine Möglichkeit dar Gravitation durch Zentrifugalkräfte zu ersetzen. Dabei kann man zwei verschiedene Typen unterscheiden, die Kurzarm-Zentrifuge und die Langarm-Zentrifuge. Unter Anwendung einer Langarm-Zentrifuge wird der Proband in einem Radius von 5 bis 10 m positioniert. Der Proband befindet sich am Ende des Zentrifugenarmes in einer Kapsel [6]. Diese Art des Trainings wird für die Herbeiführung der Auswirkungen von G-Kräften vor allem bei Piloten angewendet. In der Raumfahrt dienen diese zusätzlich der Simulation von Start- und Landephase. Für eine Anwendung in einem Raumschiff sind Langarm-Zentrifugen jedoch zu groß. Dafür kam es zur der Entwicklung der Kurzarm-Zentrifuge, welche aufgrund ihres geringeren Durchmessers besser auf einer Raumstation aufzubauen wäre [6]. Bei dieser Version liegt der Proband mit dem Kopf zur Drehachse gerichtet und die Füße zeigen nach außen.



Dargestellt ist die Kurzarm-Zentrifuge des DLR in Köln in *Abbildung 1: Kurzarm-Zentrifuge des DLR in Köln*.

**Abbildung 1: Kurzarm-Zentrifuge des DLR in Köln**



Quelle: DLR-Kurzarmzentrifuge Modul 1 der Forschungseinrichtung :envihab [8]

In dieser einmaligen Spezialentwicklung in Köln können vier Probanden zeitgleich durch Rotation der Zentrifuge den G-Kräften ausgesetzt werden [23]. Die Beschleunigungskraft wird durch die Lage der Probanden zur Mitte hin geringer und steigt nach außen hin an. Somit kann eine Verlagerung der Flüssigkeiten in die Extremitäten bewirkt werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit der Installation eines Fahrradergometers, eines Sprungschlittens und einer Vibrationsplattform auf der Zentrifuge, sodass die Probanden während der Rotation verschiedene Anwendungen durchführen können. Durch eine Veränderung des Radius ist es möglich, verschiedene Schwerkraftreize zu simulieren und diese unmittelbar durch zum Beispiel robotergeführte Ultraschalluntersuchungen und Erfassung der Bewegungsdynamik zu ermitteln [23].

## **1.4 Volumen und Funktionsverluste in der Wade durch Schwerelosigkeit und Bettruhe**

Bereits 1997 konnte nach einem Flug zur ISS eine Atrophie des Soleus Muskel um -15% und des Gastrocnemius Muskel um -10% festgestellt werden. Des Weiteren hat sich die maximale Muskelkraft um 32% verringert im Vergleich zu den Werten vor dem Aufenthalt in Schwerelosigkeit [24]. Ein weiteres Beispiel für die Relevanz der untersuchten Strukturen ist die Studie von LeBlanc et al. von 2000 [25]. Dargestellt sind die Ergebnisse der Studie in *Tabelle 1: Vergleich der Änderung des Muskelvolumens nach Aufenthalt in Schwerelosigkeit in Prozentangaben*. Untersucht wurden die Astronauten mit Hilfe eines MRT. Auffällig sind dabei besonders die Werte der hinteren Muskelgruppen des M. soleus,

M. gastrocnemius und der Hamstringmuskulatur. In dieser Untersuchung konnte bei den Probanden

der ISS ein prozentualer Verlust des Muskelvolumen von insgesamt 3-10 % festgestellt werden und auf der Mir von 5-17 %. Aufgrund dieser Daten lässt sich erkennen, dass ein Muskelschwund besonders die Beinrückseite betrifft und Forschungsbedarf in diesem Rahmen besteht [25]. Ein Zusammenhang für den starken Schwund der rückwärtigen Muskulatur lässt sich aus ihrer Funktion ableiten [5]. In Studien konnte gemessen werden, dass sogenannte Antigravitationsmuskeln, besonders die der Bein- und Rückenmuskulatur, ohne Schwerkraft stark degenerieren. Die größte Atrophie in Abhängigkeit von der

Dauer in Schwerelosigkeit in Bettruhestudien weist dabei die Wade mit den M. gastrocnemius und dem M. soleus auf [26]. Die Funktion der drei Muskeln ist sehr ähnlich [27]. Sie sind im Sprunggelenk für eine Plantarflexion und für eine Inversion zuständig. Dazu kommt durch die M. gastrocnemii eine Flexion im Kniegelenk. Diese Funktionen kann man aus dem anatomischen Aufbau der Muskeln erschließen. Dieser ist in *Abbildung 2: M. triceps surae* dargestellt. Der Ursprung des M. gastrocnemius medialis ist am medialen Epicondylus des Femur und der des M. gastrocnemius lateralis am lateralen Epicondylus des Femur. Der M. soleus entspringt an dem Caput und Collum der Fibula sowie über den Arcus tendineus der Linea m. solei an der Tibia. Zusammen setzen diese drei Muskeln an der Ferse über die Tendo calcaneus an. Zudem werden sie über denselben Nerven, den N. tibialis, innerviert [27].

**Tabelle 1: Änderung des Muskelvolumens nach Aufenthalt in Schwerelosigkeit in Prozent**

	Mir Space Station	ISS
<b>Wochen</b>	23	25,9
<b>Teilnehmerzahl</b>	16	4
<b>M. Soleus</b>	-14,3 ± 5,8	-18,6 ± 6,9
<b>M. Gastrocnemius</b>	-11,7 ± 3,9	-10,3 ± 4,7
<b>M. Quadriceps</b>	-10,0 ± 5,9	-5,4 ± 2,7
<b>Hintere Oberschenkelmuskulatur</b>	-13,8 ± 3,9	-7,2 ± 4,0
<b>Vordere Wadenmuskulatur</b>	-11,7 ± 3,2	-10,5 ± 2,9

Quelle: Eigene Darstellung von LeBlac et al. Muscle Volume after Space flight [25]

**Abbildung 2: Anatomie des M. Triceps surae**



Quelle: Prometheus; S. 482;  
1 = M. triceps surae; 2 = M. plantaris [22]

## 2 Methoden

Im Folgenden werden der Studienablauf sowie die Auswertung der Messergebnisse dargestellt. Durchgeführt wurde eine Biomedizinische Forschung am Menschen nach § 15 der Berufsordnung für nordrheinische Ärztinnen und Ärzte [8]. Der gesamte Studienablauf mit Aufenthalt der Probanden und allen Untersuchungen hat im :envi hab Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum in Köln statt gefunden [28].

### 2.1 Das Design der AGBRESA Studie

Das Hauptziel der AGBRESA Studie war es, die Veränderungen des Augen- und Hirndruckes in der Schwerelosigkeit zu untersuchen. Dabei wurden an den Probanden weitere Untersuchungen und Testungen durchgeführt, wie die Ermittlung der verschiedenen Auswirkungen einer Kurzarm-Zentrifuge, beispielsweise auf das Muskelvolumen. Die Rekrutierung der Probanden erfolgte durch öffentliche Medien. Dafür war die Abteilung für Öffentlichkeitsarbeit zuständig. Sie warben beispielsweise mit Ausschreibungen in spezifischen Zeitschriften und es erfolgte ein öffentlicher Aufruf im Internet. Des Weiteren konnten sich Probanden auf der Internetseite des DLR über die Studie genauer informieren, Informationsmaterial anfordern und sich dafür bewerben. Insgesamt wurden 24 Teilnehmer gesucht, je 12 Frauen und 12 Männer. Als Einschlusskriterien wurde dabei festgelegt, dass die Personen im Alter zwischen 24 und 55 Jahren sowie Nichtraucher sein müssen, eine Körpergröße von 153cm bis 190cm haben und der BMI (Body Mass Index) der Probanden zwischen 19 und 30 kg/m<sup>2</sup> liegt. Weiterhin müssen die Voruntersuchungen und der Test für die Toleranz der Kurzarm-Zentrifuge erfolgreich abgeschlossen sein. Zusätzlich mussten die Probanden eine Einwilligungserklärung abgeben. Rekrutiert wurden nur Personen aus dem Raum Deutschland und für die der Studienort Köln gut zu erreichen sein sollte, besonders mit Hinblick auf die Nachtuntersuchungen. Zum Ausschluss der Teilnahme an der Studie führten diverse medizinische Leiden und Erkrankungen wie Migräne, Schlafstörungen, psychische Krankheiten, Augenprobleme, Gastrointestinale Beschwerden, Diabetes mellitus und weitere gesundheitliche Einschränkungen [8].

Die Durchführung der Studie fand in zwei Blöcken statt, auf welche die Probanden aufgeteilt wurden. Der erste Zeitraum erstreckte sich von Ende März bis Ende Juni 2019, der zweite von Anfang September bis Beginn Dezember desselben Jahres. Die Zuteilung der Probanden in den ersten und zweiten Block richtete sich danach, wie die Personen privat verfügbar waren. Es wurde darauf geachtet, dass sich ebenso viele Männer wie Frauen sich in den beiden Blöcken befanden. Insgesamt hatten die Probanden eine Aufenthaltsdauer am DLR von 89 Tagen am Stück. Die Aufenthaltszeit der Probanden in

jedem der Blöcke gliederte sich in eine 14-tägige Eingewöhnungsphase, die 60-tägige Bettruhe und eine abschließende 14-tägige Regenerationsphase. Danach wurden noch weitere vier Nachuntersuchungen durchgeführt. Jeweils nach einem, drei, 12 und 24 Monaten [28].

- 5 Während der 60-tägigen, strengen Bettruhephase war das Bett um  $-6^\circ$  geneigt, sodass sich die Probanden in leichter Kopftieflage (HDT-BR: Head Down Tilt-Bedrest) befanden, um die gleiche Verlagerung der Körperflüssigkeiten zu erreichen, wie sie in der Schwerelosigkeit auftreten. Vor Beginn und nach Beendigung der Bettruhe war das Bett in der normalen waagerechten Position. Die Selbstständige Lageänderung in Bauch-, Seit-  
10 oder Rückenlage war den Probanden erlaubt. Alle Aktivitäten wie Essen, Duschen und Toilette fanden ebenfalls in HDT-BR statt. Ein Verlassen der Kopftieflage Position führte nach einmaliger Verwarnung zum Ausschluss der Studie. Während der Bettruhe fand eine passive Mobilisation der Gelenke durch einen Physiotherapeuten statt, um Folgeschäden von Bettlägerigkeit wie Dekubitus oder Spitzfuß vorzubeugen. Wichtig dabei war, dass der  
15 Proband selbst seine Muskeln nicht aktivierte [28].
- Während des Forschungsablaufs wurde das Essen von Ernährungswissenschaftlern vorbereitet und die Nahrungsaufnahme überwacht. Dabei wurde für jeden einzelnen Probanden die benötigte Kalorienmenge über den Tag berechnet und zugereicht. Daher war es wichtig, dass die Teilnehmer immer alles aufaßen. Für Freizeitaktivitäten waren die  
20 Zimmer mit Fernseher und WLAN ausgestattet und es gab einen Gemeinschaftsraum, in welchen sich die Teilnehmer zum Kartenspielen auf Nachfragen treffen konnten. Des Weiteren kam während beider Blöcke der Untersuchung ein Astronaut zu Besuch, um Fragen zu beantworten und einen Austausch mit den Probanden über ihre Lage zu führen. Zudem wurden die Teilnehmer psychologisch betreut [28].
- 25 Per Zufallsverfahren wurden die Teilnehmer in jedem der zwei Blöcke nach der Eingewöhnungszeit in drei Gruppen aufgeteilt. Dabei wurden Frauen und Männer getrennt gelost, damit in jeder der drei Einheiten beide Geschlechter möglichst homogen vertreten sind. Dabei hat die erste Gruppe, die Kontrollgruppe keine Interventionen erhalten. Die Intervallgruppe wurde täglich eine Stunde auf der Kurzarm-Zentrifuge therapiert. Dabei fand  
30 fünf Minuten lang die Rotation auf der Zentrifuge statt und danach folgten fünf Minuten Pause. In alternierender Reihenfolge absolvierten die Teilnehmer insgesamt je eine halbe Stunde auf der Zentrifuge. Dahingegen verbrachte die Interventionsgruppe eine halbe Stunde ohne Unterbrechung in Rotation auf der Zentrifuge. Diese hat sich in Abhängigkeit von den Probanden mit einer Geschwindigkeit von 25–30 rpm (revolutions per minute)  
35 gedreht, wodurch eine Kraft von 1 g (Center of Mass) auf die Probanden gewirkt hat. Auf der Zentrifuge lagen die Personen auf dem Rücken mit den Füßen in Neutral-Null Stellung

an einer Platte. Während der Zeit auf der Kurzarm-Zentrifuge erfolgte eine Überwachung der Probanden durch medizinisches Fachpersonal und ein Pulsoximeter sowie eine Elektrokardiographische Datenaufnahme. Die Teilnehmer wurden angewiesen, während des Aufenthaltes die Muskeln nicht anzuspannen und möglichst ruhig liegen zu bleiben.

- 5 Die Probanden wurden täglich in der Zeit der 60-tägigen Bettruhe sowie anschließend zur Rehabilitation physiotherapeutisch betreut. Angewendet wurden zu Beginn der Bettruhephase Techniken wie Massage, Querfraktion, Kompression und Vibrationen. Dabei lag der Fokus besonders auf der Schulter-Nacken Muskulatur sowie dem oberen und unteren Rücken. Nach der individuellen Eingewöhnungsphase verlagerte sich der
- 10 Behandlungsschwerpunkt auf den unteren Rücken, die Beine und die Füße. Zusätzlich bekamen die Teilnehmer ein Dehnungsprogramm von den Physiotherapeuten gezeigt, welches zweimal täglich durchzuführen war, um Verkürzungen zu verhindern. Dieses wurde bis kurz vor Abschluss der Bettruhe beibehalten. Kurz vor dem ersten Aufstehen kamen zusätzlich Reflextests und verschiedene Bewegungsabläufe hinzu, um die Regeneration
- 15 danach unterstützen zu können. Nach Abschluss der Studie fand für die Probanden ein zehntägiges Wiederaufbautraining statt. Bestandteil davon waren Massage, Dehnung der Muskeln, Ausdauertraining und Koordinationsaufgaben. Dafür wurden in einem gesonderten Protokoll die Werte vor Beginn der Studie aufgezeichnet und mit den Ergebnissen kurz nach Beendigung verglichen [28].

## 20 **2.2 Durchführung der MRT Messungen**

- Bei den Probanden wurden zu verschiedenen Zeitpunkten MRT Bilder des linken Beines angefertigt. Hauptziel dieser Untersuchungen war mit Hilfe eines nichtinvasiven Verfahrens die Effekte von Bettruhe darstellen zu können. Zwei Messungen fanden 14 Tage und acht Tage vor Beginn der Bettruhe statt. Nach Ablauf der 60-tägigen Bettphase wurden in einem
- 25 Zeitraum von fünf bis sieben Tagen posterior die ersten Messungen angefertigt. Weitere Werte wurden nach 28 Tagen und abschließend 90 Tage nach Ende der Bettruhe ermittelt. In dieser Arbeit werden die Messungen im Zeitraum unmittelbar vor Beginn der Bettruhe, acht Tage zuvor sowie kurz nach Ende, sieben Tage danach, betrachtet. Zeitgleich wurde die Muskelkraft der Probanden dokumentiert, um die Ergebnisse der Kraft und des
- 30 Muskelvolumens nach Abschluss der Studie vergleichen und mögliche Zusammenhänge feststellen zu können. Dafür wurden die MRT und Muskelkraftmessungen in dem gleichen Zeitraum angefertigt. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Teil der Muskelvolumina. Zu diesem Zweck wurden pro Proband die Messungen zu Beginn und nach Beendigung der Bettphase ausgewertet.

Im MRT wurden beiden Füße der Probanden mit einer Platte in 5° Plantarflexion und 10° Eversion gestützt und mit Riemen fixiert. Der Proband lag von den Füßen bis zur Lendenwirbelsäule auf einer MRT-Rückenspule. Die MRT-Signale von oben wurden mit fünf aneinander gereihten Flex-Spulen von 22cm Länge aufgenommen. Je nach

5 Körpergröße der Probanden wurde die Anzahl der platzierten Flex-Spulen variiert. Die Messungen wurden von einer Person durchgeführt, welche nicht über die Gruppenzuteilung der Probanden informiert war. Genauso wurde für jeden Probanden die Reihenfolge der Aufnahmen der MRT-Daten gegenüber der auswertenden Person, verblindet.

Da sich diese Arbeit auf die Muskeln der Wade begrenzt, erfolgte die Segmentierung von dem Fibula-Tibia Gelenk aus bis in den Ansatz der Muskeln, dem Übergang in die

10 Achillessehne.

### 2.3 Auswertung und Kontrolle der MRT Bilder

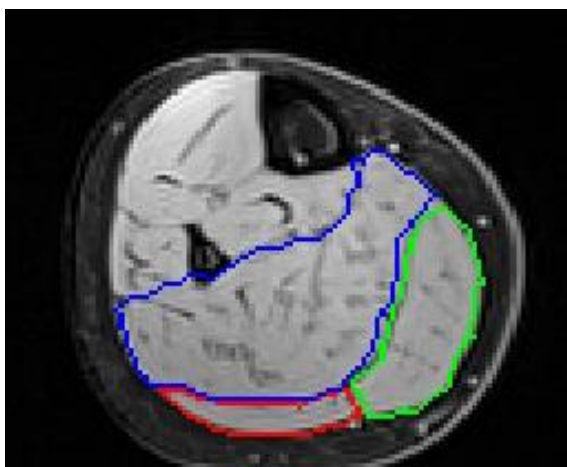
Mit Hilfe des Programms ROI Segmenter 1.7.7 der Hochschule Niederrhein (iPattern – Institut für Mustererkennung der Hochschule Niederrhein in Krefeld) fand die Auswertung

15 der angefertigten MRT Bilder statt. Bearbeitet wurden die Aufnahmen von acht Tagen vor Beginn der Bettruhe und fünf Tage nach Beendigung dieser. Das bedeutet, dass pro Proband zwei Aufnahmeserien bearbeitet wurden. Zuerst erfolgte die Segmentierung des M. soleus der in *Abbildung 3: Segmentierung der drei Wadenmuskeln* in blau dargestellt ist. Dabei wurde bei jedem Muskel in der Mitte begonnen wo er gut sichtbar ist und von

20 dort aus kranial zum Tibia-Fibula Gelenkspalt gearbeitet und Richtung kaudal bis in den Übergang in die Achillessehnen [29]. Das Bild wurde im mittleren Drittel der Wade angefertigt. Danach erfolgte die Bearbeitung des M. gastrocnemius medialis in grün.

#### Abbildung 3: Segmentierung der drei Wadenmuskeln

M. soleus (blau), M. gastrocnemius lateralis (rot), M. gastrocnemius medialis (grün)

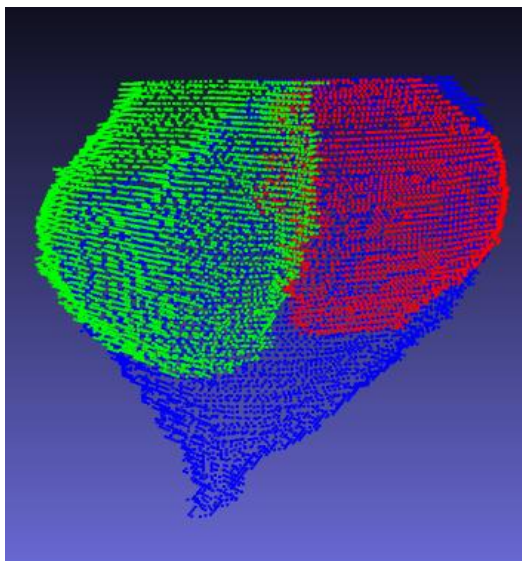


Quelle: Eigene Darstellung mit ROI-Segmenter

Ebenfalls in *Abbildung 3* dargestellt. Das Programm des ROI Segmenter passt die farbige Umrandung größtenteils automatisch der Größe des Muskels an, wenn man von einem Bild zum darauffolgenden wechselt. Die Aufnahmen wurden einheitlich angefertigt, sodass der Abstand von proximal nach distal zwischen den einzelnen Bildern immer 4mm beträgt. Um eine gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde die obere Grenze für die Segmentierung im Gelenkspalt von Tibia und Fibula festgelegt, da bis zu diesem Zeitpunkt eine gute Differenzierung zwischen den einzelnen Muskeln möglich ist. Ein distales Ende wurde nicht definiert. Es erfolgte die Segmentierung der drei Muskeln bis in ihren Ansatz, also dem Übergang in die Achillessehne. Nach der kompletten Segmentierung erfolgte eine Überprüfung der Qualität mit verschiedenen Hilfsmitteln. Zuerst wurden alle drei Muskeln über ihren kompletten Verlauf erneut kontrolliert. Dabei wurde während dem kompletten Verlauf der Muskeln von dem Tibia-Fibula Gelenkspalt bis zum Ansatz kontrolliert, dass keine Überlappungen vorhanden waren, Gefäße nicht eingeschlossen und keine Aufnahme übergangen wurde. Eine weitere Kontrollmethode, ist das Betrachten der fertig ausgearbeiteten Werte im ROI – Segmenter Programm unter Anwendung der 3D Darstellung wie in *Abbildung 4: 3D Darstellung der Wade von posterior* gezeigt. Hier konnten sich erste grobe Fehler und Abweichungen zeigen, welche im Folgenden bearbeitet wurden. In *Abbildung 4* ist in blau wieder der M. soleus, in grün der M. gastrocnemius medialis und in rot der M. gastrocnemius lateralis gezeigt. Abweichungen aufgrund der Segmentierung würden sich durch Ausreißer am Rand der Muskeln oder durch Überschneidungen zeigen, sodass kein flüssiger Verlauf der Ränder gegeben ist. Im

#### **Abbildung 4: 3D Darstellung der Wade von posterior**

M. soleus (blau), M. gastrocnemius lateralis (rot), M. gastrocnemius medialis (grün)



Quelle: Eigene Darstellung mit ROI-Segmenter



Anschluss an die beiden Selbstkontrollen, die nach jeder bearbeiteten Datei statt gefunden haben, analysierte das Programm die Daten, welche anschließend in eine Excel-Tabelle überführt wurden. Eine weitere Kontrolle der Daten wurde durch eine Überprüfung der Werte mit Hilfe von Plots gemacht. Hierbei wurden drei Plots je einzelnen Muskel erzeugt.

### Abbildung 5: Plotdarstellung der Querschnittsflächen der drei Wadenmuskeln

X-Achse: Muskellänge in mm

Y-Achse: Muskelfläche in  $\text{cm}^2$

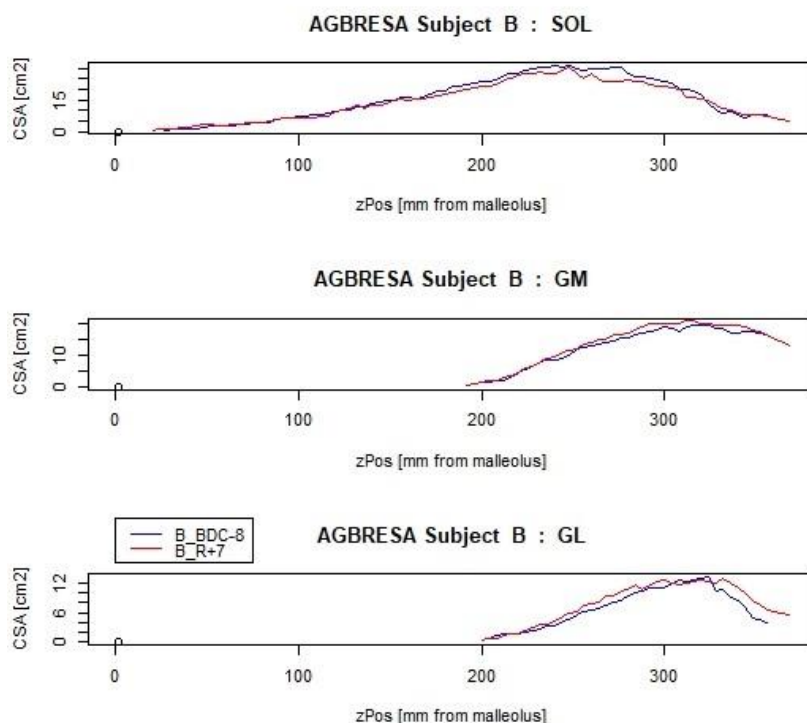
SOL: M. soleus

GM: M. gastrocnemius mediale

GL: M. gastrocnemius laterale

Blau: BDC-8 (baseline data collection)

Rot: R+5 (recovery phase)



Quelle: Plots aus den Werten von Proband B

- 5 In *Abbildung 5: Plotdarstellung der Querschnittsflächen der drei Wademuskeln* sind exemplarisch für Proband B die Kontrollen gezeigt. Dargestellt wird durch die Graphen der Verlauf der Fläche der drei Muskeln. Dabei markiert  $z=0$  die Ebene, in der auf dem MRT-Bild der Malleolus zu sehen ist. Von dort aus wurden die Querschnitte der Muskeln in kranialer Richtung bis zum Knie aufgetragen. Bei der Bearbeitung ist der Slice-Abstand von
- 10 4mm welcher zwischen den Bildern liegt zu beachten. Die einzelnen Punkte wurden durch eine Linie verbunden und ergeben so die gezeigten Kurven.
- Auf der X-Achse ist die Länge des Muskels dargestellt, angegeben in Millimeter (mm) und auf der Y-Achse die Fläche des segmentierten Muskels in Quadratcentimeter ( $\text{cm}^2$ ). Das obere Diagramm zeigt den Verlauf des M. soleus (SOL) wobei der blaue Graph die
- 15 Muskelfläche acht Tage vor der Bettruhe (BDC-8) anzeigt und der rote die Werte fünf Tage



nach Abschluss (R+5). In dem mittleren Diagramm ist der Verlauf des M. gastrocnemius medialis (GM) und im Unteren der Verlauf des M. gastrocnemius lateralis (GL) gezeigt. Insgesamt sind keine größeren Ausreißer in dem Verlauf der Graphen zu erkennen. Solche Ausreißer hätten einen möglichen Fehler während der Segmentierung bedeutet. Dann wäre der Muskel mit Hilfe des ROI-Segmenter kontrolliert und die fehlerhafte Stelle korrigiert worden. Die Auswertung der gewonnen Daten fand mit dem Statistikprogramm SPSS (Statistical Package for the Social Sciences, Version 21, JBM-Deutschland-GmbH, Ehningen) statt.

In der Bettruhestudie wird ein Wert als signifikant angenommen, wenn dieser einen p-Wert von 0,05 ( $p < 0,05$ ) unterschreitet [30]. Soll der Effekt der Kurzarm-Zentrifuge auf den Muskelschwund an der Wade bezogen als wirksam eingestuft werden, muss ein signifikanter Unterschied zwischen den Messwerten der einzelnen Gruppe bezüglich der Bettruheeffekte bestehen.

### 3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Studie dargestellt und erläutert. Um die Fragestellung, ob künstliche Schwerkraft Bettruhe bedingten Muskelschwund an der Wade verringern kann, beantworten zu können, wurden an 20 Probanden MRT Messungen vor und nach einer 60-tägigen Bettruhe durchgeführt. Die Auswertung der gewonnenen Daten fand mit dem Statistikprogramm SPSS statt. 24 Probanden haben die Studie begonnen. Da vier Teilnehmer im Verlauf der Untersuchungen aufgrund gesundheitlicher Probleme abbrechen mussten, haben 20 die Messungen beendet und wurden in die Auswertung mit einbezogen. Somit befanden sich sechs Personen in der Kontrollgruppe ohne jegliche Intervention. Weiterhin waren sieben in der Intervallgruppe, welche auf der Kurz-Arm Zentrifuge therapiert wurde. Ebenso viele Probanden waren in der Interventionsgruppe. In dem zweiten Block Ende 2019 kam es zum einem Terminbedingten Ausfall der vier Personen, drei Männern und einer Frau. In

**Tabelle 2: Anzahl Probanden der AGBRESA Studie**

Intervention		Anzahl
<b>Kontroll- gruppe</b>	Männer	4
	Frauen	2
	Gesamt	6
<b>Intervall- gruppe</b>	Männer	4
	Frauen	3
	Gesamt	7
<b>Interventions- gruppe</b>	Männer	5
	Frauen	2
	Gesamt	7
<b>Insgesamt</b>	Männer	13
	Frauen	7
	<b>Gesamt</b>	<b>20</b>

Quelle: Eigene Darstellung

Studie sind die verschiedenen Interventionen mit ihrer Probandenanzahl übersichtlich dargestellt. Folglich haben insgesamt 20 Personen, wovon 13 männlich und sieben weiblich waren, die Studie erfolgreich abgeschlossen. Die in der Studie ermittelten Daten der drei untersuchten Wadenmuskeln werden im Folgenden in den Tabellen 3, 4 und 5 dargestellt. Aufgeführt wurden der Mittelwert und die Standardabweichung für das in Milliliter angegebene Volumen der verschiedenen Gruppen bezüglich der Zeitpunkte vor und nach der Bettruhe. Daneben ist die zugehörige Volumenänderung des Muskels in Prozent für den Mittelwert und die Standardabweichung angegeben. N beschreibt die Teilnehmeranzahl in den verschiedenen Gruppen. BDC-8 steht dabei für die *baseline data collection*, die Voruntersuchung welche acht Tage vor Beginn der 60-tägigen Bettruhe stattfand. Dazugehörig steht R+5 für *recovery phase*, was die Datenaufnahme fünf Tage nach Beendigung der Ruhephase bezeichnet. Die Werte in den Tabellen sind auf zwei Nachkommastellen gerundet.

**Tabelle 3: Werte des M. gastrocnemius medialis**

Intervention		Volumen in ml		Delta Volumen in %		N
		Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	
<b>Kontrollgruppe</b>	BDC-8	184,20	41,78	-2,78	9,28	6
	R+5	178,62	38,08			
<b>Intervallgruppe</b>	BDC-8	177,15	41,42	-9,10	5,07	7
	R+5	160,27	34,01			
<b>Interventions- gruppe</b>	BDC-8	225,52	55,72	-6,71	10,77	7
	R+5	210,88	52,04			
<b>Insgesamt</b>	BDC-8	196,19	49,78	-6,18	8,61	20
	R+5	183,49	45,66			

Quelle: Eigene Darstellung; Werte gerundet auf zwei Nachkommastellen; BDC-8 (baseline data collection); R+5 (recovery phase)

Aus diesen Daten ergibt sich für den M. gastrocnemius medialis eine Signifikanz für die Delta Volumenänderung von **p = 0,005**. Damit konnten unterschiedliche Bettruheeffekte bei diesem Muskel in den Gruppen festgestellt werden.

**Tabelle 4: Werte des M. gastrocnemius lateralis**

Intervention		Volumen in ml		Delta Volumen in %		N
		Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	
<b>Kontrollgruppe</b>	BDC-8	104,02	16,08	3,71	8,48	6
	R+5	108,74	22,55			
<b>Intervallgruppe</b>	BDC-8	102,29	23,53	-5,56	6,29	7
	R+5	96,78	23,93			
<b>Interventions- gruppe</b>	BDC-8	111,21	35,09	-2,57	12,24	7
	R+5	107,98	33,57			
<b>Insgesamt</b>	BDC-8	105,93	25,46	-1,73	9,68	20
	R+5	104,29	26,51			

Quelle: Eigene Darstellung; Werte gerundet auf zwei Nachkommastellen; BDC-8 (baseline data collection); R+5 (recovery phase)

Die Signifikanz für die Änderung des Muskelvolumen des M. gastrocnemius lateralis liegt bei **p = 0,433**. Aufgrund der in dieser Arbeit definierten Grenze von  $p < 0,05$  konnte keine signifikante Veränderungen zwischen den Gruppen bei diesem Muskel verzeichnet werden.

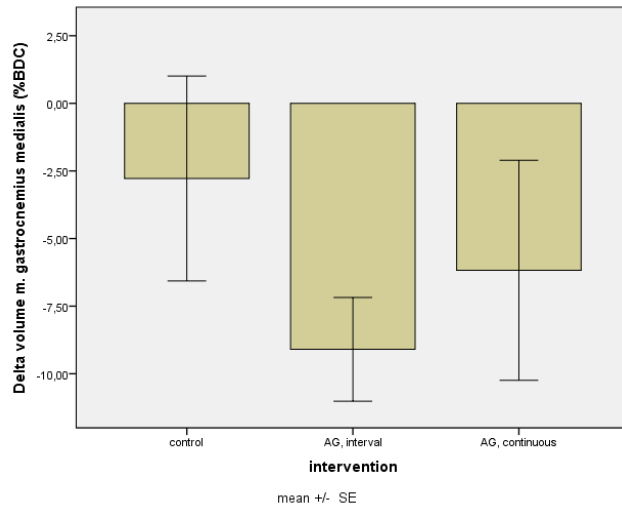
**Tabelle 5: Werte des M. soleus**

Intervention		Volumen in ml		Delta Volumen in %		N
		Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	
<b>Kontrollgruppe</b>	BDC-8	509,84	87,43	-6,91	9,12	6
	R+5	477,66	103,72			
<b>Intervallgruppe</b>	BDC-8	466,64	67,53	-11,33	5,33	7
	R+5	411,35	44,65			
<b>Interventions- gruppe</b>	BDC-8	523,70	92,97	-12,01	6,95	7
	R+5	459,89	83,25			
<b>Insgesamt</b>	BDC-8	499,57	82,64	-10,24	7,16	20
	R+5	448,23	80,46			

Quelle: Eigene Darstellung; Werte gerundet auf zwei Nachkommastellen; BDC-8 (baseline data collection); R+5 (recovery phase)

Mit einem p-Wert von **p = 0,000** wurde für den M. soleus ein signifikanter Unterschied des Delta Muskelvolumens zwischen den Interventions- und der Kontrollgruppe ermittelt. Die angegebenen Werte für die Delta Volumenänderung der drei untersuchten Muskeln sind in den folgenden *Abbildungen 6, 7 und 8* übersichtlich dargestellt. Auf der X-Achse der Abbildungen sind die drei verschiedenen Interventionsgruppen aufgezählt. Dabei steht *control* für die Kontrollgruppe, *AG, interval* für die Intervallgruppe und *AG, continuous* für die Interventionsgruppe, welche eine halbe Stunde am Stück auf der Zentrifuge war. Auf der Y-Achse ist das Delta Volumen des entsprechenden Muskels in Prozent angegeben.

**Abbildung 3: Delta Volumenänderung des M. gastrocnemius medialis**

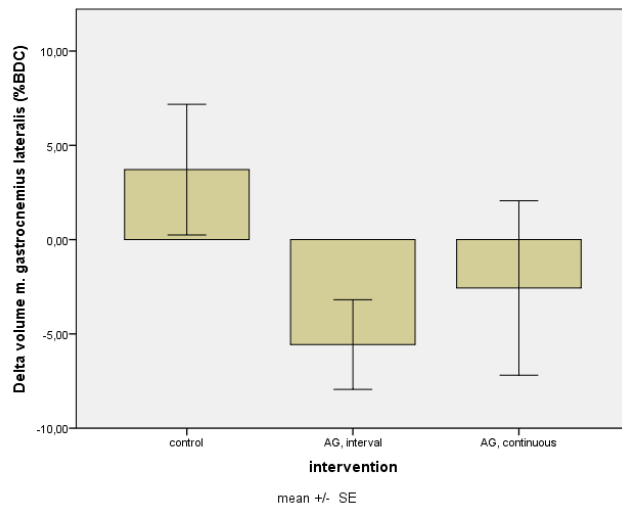


X-Achse: Delta Volumen in Prozent

Y-Achse: Interventionsgruppe

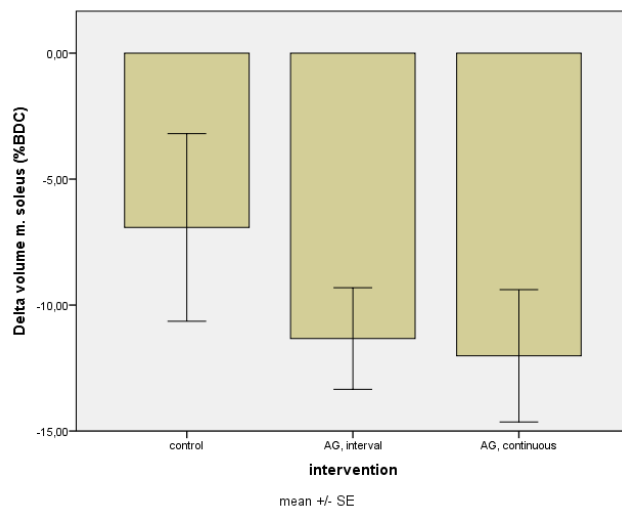
Quelle: Eigene Darstellung der Delta Volumenänderung der Muskeln mit SPSS in Balkendiagrammen

**Abbildung 4: Delta Volumenänderung des M. gastrocnemius lateralis**



5

**Abbildung 5: Delta Volumenänderung des M. soleus**



Bei der Betrachtung der Delta-Werte der Muskelflächen vor und nach der HDT-BR beim M. gastrocnemius medialis (Abbildung 6) eine große Streuung der Werte in der Kontrollgruppe mit einer Standardabweichung von 9,28 % und in der Interventionsgruppe mit 10,77 % zu verzeichnen. Bei dem M. gastrocnemius lateralis (Abbildung 7) ist in der Kontrollgruppe eine Variation der Werte um den Mittelwert von 8,48 % und in der Interventionsgruppe von 12,24 % ermittelt worden. Des Weiteren liegen die Werte der Kontrollgruppe im Mittel mit 3,71 % im positiven Bereich, was sich im Vergleich zu den anderen Gruppen absetzt. In Bezug auf den M. soleus fällt die Kontrollgruppe mit einer hohen Standardabweichung vom Mittelwert von 9,12 % auf.

Die *Tabelle 6: Zusammenfassung der p-Werte* stellt abschließend übersichtlich die verschiedenen Ergebnisse der p-Werte dar, welche durch die Analyse der gewonnenen Werte ermittelt werden konnten. Dabei wurden mit der Methode Linear Mixed Effects (LME) für die absoluten Volumina die festen Faktoren Tag, Intervention, Tag\*Intervention getestet. Die mittleren prozentualen Delta-Werte der Volumina wurden mittels t-Test gegen null getestet.

**Tabelle 6: Zusammenfassung der p-Werte**

Muskel	Tag	Sig. Intervention	Sig. Tag*Intervention	Alle Deltas gegen 0	
				T-Test	Sig. 2-seitig
<b>M. soleus</b>	0,027	0,185	0,835	-6,403	0,000
<b>M. gastrocnemius medialis</b>	0,224	0,006	0,901	-3,208	0,005
<b>M. gastrocnemius lateralis</b>	0,861	0,774	0,853	-0,800	0,433

Quelle: Eigene Darstellung der p-Werte durch SPSS; Sig. (Signifikanz)

Bezogen auf den Faktor Tag wurde dabei die Wirksamkeit des Bettruheeffekts auf die Probanden unter Anwendung der Werte von BDC-8 und R+5 ermittelt. In diesem Zusammenhang konnte bei dem M. soleus mit  $p = 0,027$  ein Bettruheeffekt festgestellt werden.

Die untersuchten Werte der Intervention geht davon aus, dass signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen bezogen auf die Volumenänderung der Muskeln zu beobachten war. Das war bei dem M. Gastrocnemius medialis mit  $p = 0,006$  festzustellen.

Die Signifikanz, welche den Tag und die Intervention vergleicht, dient der Darstellung des Bettruheeffektes zwischen den drei Gruppen. Unter Anwendung dieses Wertes wurde überprüft, ob sich die Intervention einer Kurzarm-Zentrifuge als Maßnahme gegen

Mikrogravitation eignet. In diesem Zusammenhang wurde kein signifikanter Wert festgestellt.

Um diese Werte genauer zu überprüfen wurden die Delta-Werte der Muskeln in Prozent gegen Null getestet, was von keinem Effekt der Bettruhe ausgeht. Angefertigt wurde dieser

5 Test, um eine sensiblere Aussage darüber zu treffen, ob die künstliche Schwerkraft dem Muskelschwund entgegengearbeitet hat. In diesem Zusammenhang konnte eine Signifikanz für die Änderung des Muskelschwund bei dem M. soleus mit  $p=0,000$  und bei dem M. gastrocnemius medialis mit  $p=0,005$  festgestellt werden. Für den M. gastrocnemius lateralis ist der Wert  $p=0,433$  nicht signifikant. Abschließend kann damit gesagt werden,

10 dass anhand der analysierten Ergebnisse die Intervention einer Kurarm-Zentrifuge bei zwei von drei Muskeln eine signifikante Reduktion des Muskelschwundes bewirkt hat.

15

20

25

## 4 Diskussion

Diese Arbeit hat den Effekt einer Kurzarm-Zentrifuge auf Muskelschwund an der Wade in Folge von Bettruhe untersucht. Dafür wurde der Unterschied zwischen einer Interventionsgruppe, welche täglich 30 Minuten auf der Kurzarm-Zentrifuge rotiert und einer Intervallgruppe, die jeden Tag sechs mal fünf Minuten mit jeweils fünf Minuten Pause rotiert ist, untersucht. Unter Anwendung eines MRT-Geräts wurde im Folgenden das Muskelvolumen der Muskeln M. soleus, M. gastrocnemius lateralis und medialis acht Tage vor und fünf Tage nach der 60-tägigen Bettruhe ermittelt. Anhand der gewonnenen Werte kann die Aussage getroffen werden, dass künstliche Schwerkraft nur teilweise Einfluss auf bettruhebedingten Muskelschwund an der Wade hat. Ein signifikantes Ergebnis bezogen auf die unterschiedlichen Bettruheeffekte zwischen den drei Gruppen konnte bei dem M. gastrocnemius medialis mit  $p=0,005$  sowie dem M. soleus mit einem Wert von  $p=0,000$  ermittelt werden. In Bezug auf den M. gastrocnemius lateralis konnte mit einem p-Wert von  $p=0,433$  kein signifikanter Unterschied durch die Intervention mit der Kurzarm-Zentrifuge gezeigt werden.

Es konnten in diesem Zusammenhang teils signifikante Ergebnisse generiert werden, wodurch die H1 Hypothese abgelehnt und H0 angenommen werden muss. Aufgrund des nicht übereinstimmenden Ergebnisses kann gesagt werden, dass künstliche Schwerkraft keine Auswirkungen auf bettruhebedingten Muskelschwund an der Wade hat.

### 4.1 Interpretation der Ergebnisse

Bei der Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass der Volumenverlust der Muskeln durch die Bettruhe nur durch ein signifikantes Ergebnis von den Vergleichen der aus den Prozentsätzen errechneten Deltas gegen Null zu erkennen ist. Wenn man die Hypothese präziser bezüglich der drei Muskeln aufgestellt hätte, könnte man für zwei Muskeln eine Bestätigung der H1 Hypothese formulieren.

Eine Interpretation der Ergebnisse dieser Arbeit fand unter Anwendung der Daten fünf Tage nach dem Aufstehen statt. In dieser Zwischenzeit können verschiedene Einflussfaktoren wie zum Beispiel Wassereinlagerungen das Muskelvolumen beeinflusst haben. Dadurch wurde eine genaue Analyse der Werte erschwert.

### 4.2 Limitationen der Studie

In der vorliegenden Arbeit muss zwischen den Limitationen, welche durch die Durchführung der Studie bedingt waren und denen, welche durch den Rahmen dieser Arbeit entstanden sind, unterschieden werden. Die Studie weist Limitationen in der Anzahl der Probanden auf. Aufgrund zeitlicher Einschränkungen konnten ausgefallene Probanden für



die Untersuchungen nicht ersetzt werden. Inwiefern die fehlenden vier Personen das Ergebnis beeinflusst hätten, ist schwierig zu bewerten.

In Bezug auf die Interventionen war es den Probanden auf der Kurzarm-Zentrifuge erlaubt, bei Beschwerden die Muskelpumpe anzuwenden. Dadurch erfolgte eine zusätzliche Aktivität der Wade, welche im besten Fall vermieden werden sollte. Insofern muss das Ergebnis in Relation zu der alleinigen Wirkung der Zentrifuge kritisch betrachtet werden. Zusätzlich können die Belastungen auf der Zentrifuge insbesondere während der Anfangszeit zu isometrischen Muskelkontraktionen bei den Probanden geführt haben. Zur Überprüfung der Muskelaktivität wurde eine Elektromyografie (EMG) stichprobenartig bei den Probanden angefertigt. Die Auswertung dieser Daten liegt zum jetzigen Zeitpunkt nicht vor, sodass die Auswirkungen der Muskelkontraktion auf die Ergebnisse nur schwer abgeschätzt werden konnten.

Pro Proband wurde lediglich das linke Bein im MRT vermessen, was eine weitere Limitation dieser Studie darstellt. Für ein aussagekräftiges Ergebnis über die Entwicklung des Volumens der Muskulatur, wäre es sinnvoll gewesen beide Seiten zu vergleichen. Für die Auswertung der MRT-Bilder wurde das Programm ROI-Segmenter genutzt. Probleme bei der Ausführung dieser Software können ebenfalls das Ergebnis beeinflusst haben. Sofern das Programm während der Bearbeitung der MRT-Bilder unerwartet beendet wurde, konnte anschließend die Funktion der automatischen Muskelumrandung für selbige nicht mehr genutzt werden. Somit waren die Übergänge zwischen den drei Muskeln schwerer zu identifizieren. Zusätzlich haben sich mit jedem Öffnen und Schließen des Programms nach der Bearbeitung der Daten die Werte minimal verschoben, sodass nach dem Export der Daten in eine Exceltabelle von der originalen Auswertung abweichende Ergebnisse entstanden sind. Des Weiteren konnten bei drei Probanden die Aufnahmen nicht durchgehend verknüpft werden, sodass die Daten aus verschiedenen Dateien zusammengeführt wurden. Ähnlich war die Problematik mit der Fett- und Wasserauflösung, da es zwei verschiedene Möglichkeiten der Darstellung von MRT-Bildern gibt. Dies führte bei einigen Messungen zu gemischten Dateien, bei denen in der Mitte der Sequenzierung eines Muskels die Darstellungsart von der Fettauflösung in die Wasservariante wechselte. Aufgrund dieser Störungen kann es zu Problemen bei der Sequenzierung der Muskeln gekommen sein.

Weiterhin ist diese Arbeit durch den fehlenden Vergleich zu den Daten, welche bei den Probanden kurz vor Beendigung der 60-tägigen Bettruhe aufgenommen wurden, limitiert. Um weitere Aussagen treffen zu können, kann hier in Zukunft ein Vergleich durchgeführt werden. Dadurch könnte der Effekt, welcher sich kurz nach dem Aufstehen einstellt, ausgeschlossen werden und eine differenzierte Bewertung der Auswirkungen durch die

Zentrifuge auf den Bettruheeffekt wäre möglich. In diesem Design wurden die Aufnahmen zu einem späteren Zeitpunkt angefertigt, um die Parallele zu der Landung der Astronauten herzustellen. Die Möglichkeit bei diesen Messungen durchzuführen, ergibt sich ebenfalls meist erst einige Tage nach der Landung. Dadurch erlangen Effekte aus der Gravitation der Erde einen nicht unwesentlichen Einfluss auf die von Mikogravitation geprägte Muskulatur der Astronauten. Die Aussagenbildung zu den Ergebnissen der Nachuntersuchung wird so erschwert.

Des Weiteren wurde in der Studie getestet, wie sich die Verträglichkeit der Zentrifuge für die Probanden über einen längeren Zeitraum entwickelt. In diesem Zusammenhang hat es keine Komplikationen gegeben. Eine Limitation für die Bewertung der Ergebnisse dieser Arbeit ist der Umstand, dass es für den langen Zeitrahmen von 60 Tagen in diesem Studiendesign auf die Entwicklung des Muskelvolumens bezogen keine Vergleichswerte, welche mit dem MRT gemessen wurden, gibt. Dadurch wird eine weitere Beurteilung der gewonnen Werte erschwert.

### **4.3 Ausblick**

Im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung der Raumfahrt werden weitere Forschungen benötigt, um die Auswirkungen der Schwerelosigkeit auf den Menschen zu untersuchen. Diese Studie hat gezeigt, dass die Anwendung einer Kurzarm-Zentrifuge für die Simulation künstlicher Schwerkraft gute Ergebnisse in Bezug auf den Muskelschwund an der Wade hervorbringen kann. Um die entstandenen Probleme untersuchen und verbessern zu können, werden in Zukunft weitere Studien in diesem Umfang stattfinden.

Dabei könnten beispielsweise Probanden während der Zentrifugation Übungen wie Kniebeugen ausführen, um den Reiz auf die Muskulatur zu vergrößern [31]. Perspektivisch muss an der Stärke des Reizes und seiner Auswirkung auf den menschlichen Körper geforscht werden, um die Effektivität von verschiedenen Interventionen steigern zu können. Besonders im Hinblick auf kommende Weltraummissionen, wie dem Flug zum Mars und der Kommerzialisierung, steht die Forschung unter Druck, die Gesundheitsrisiken zu minimieren. Dabei werden weiterhin strenge Auswahlkriterien bestehen, um den Schutz der Personen gewährleisten zu können. Allerdings bietet die Kommerzialisierung die Chance, durch private Investoren die Entwicklung verschiedenster Techniken schneller voranzutreiben, um mehr Personen die Möglichkeit eines Aufenthalts im Weltraum zu bieten. Dafür müssen auf medizinischer Ebene Leitlinien für die Weltraumpassgiere entwickelt werden. Bereits seit 2001 beschäftigen sich diverse Wissenschaftsgruppen mit dieser Thematik, um Investoren in der Raumfahrt mit ihren Erkenntnissen zu unterstützen [12, 32]. In diesem Zusammenhang stellt die Simulation künstlicher Schwerkraft ein großes

wissenschaftliches Potential dar, damit Weltraummissionen zukünftig in einem größeren Umfang stattfinden können.

Die zukünftige Herausforderung der Wissenschaft im Feld der Auswirkungen von Mikrogravitation, bezieht sich nicht nur auf die in dieser Arbeit dargestellten Prozesse.

- 5 Damit die körperlichen Veränderungen besser behandelt werden können, muss der komplexe Prozess, welcher in diesem Zusammenhang abläuft, bis auf molekulare Ebene verstanden und untersucht werden. Mit diesem Wissen kann anschließend ein effektiveres Training als Gegenmaßnahme zur der Schwerelosigkeit stattfinden [12].

10

15

20

25

## 5 Schlussfolgerung

Abschließend ist festzustellen, dass die Unterschiede der Ergebnisse zwischen der auf der Zentrifuge therapierten Interventions- und Intervallgruppe geringfügig sind. Aufgrund mangelnder signifikanter Unterschiede lässt sich in Bezug auf diesen Therapieansatz keine gerichtete Empfehlung aussprechen.

Im Gegensatz dazu wurden zwischen den Interventionsgruppen und der nicht therapierten Kontrollgruppe nach der 60-tägigen Bettruhe bei zwei von drei Muskeln signifikante Unterschiede durch die Zentrifugation gemessen. Damit kann dargelegt werden, dass bei dem M. soleus und M. gastrocnemius medialis durch die Zentrifuge Muskelschwund an der Wade, welcher infolge der Bettruhe auftrat, verringert wurde. In folgenden Studien und mit weiteren Vergleichen gewonnener Daten muss analysiert werden, warum bei dem M. gastrocnemius lateralis ein abweichendes Ergebnis erzielt wurde. Weiterhin sollte dieser Umstand in zukünftigen Forschungen berücksichtigt werden um die Aussagekraft der gewonnen Daten erhöhen zu können.

Zusätzlich bietet es sich an, EMG Sensoren an beiden Beinen anzubringen, um unerwünschte Effekte durch die Zentrifuge ausschließen und unterschiedliche Muskelaktivität feststellen zu können. In Hinsicht auf zukünftige Studien sollten in diesem Zusammenhang ebenfalls die Muskeln beider Beine im MRT seziert und ausgewertet werden [31].

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 6: Kurzarm-Zentrifuge des DLR in Köln .....	9
Abbildung 7: Anatomie des M. triceps surae.....	10
Abbildung 3: Segmentierung der drei Wadenmuskeln.....	14
5   Abbildung 4: 3D Darstellung der Wade von posterior.....	15
Abbildung 5: Plotdarstellung der Querschnittsflächen der drei Wadenmuskeln.....	16
Abbildung 8: Delta Volumenänderung des M. gastrocnemius medialis.....	21
Abbildung 9: Delta Volumenänderung des M. gastrocnemius lateralis.....	21
Abbildung 10: Delta Volumenänderung des M. soleus.....	21

10

15

20

25

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Änderung des Muskelvolumens nach Aufenthalt in Schwerelosigkeit in Prozentangaben.....	10
Tabelle 2: Anzahl Probanden der AGBRESA Studie.....	18
5    Tabelle 3: Werte des M. gastrocnemius medialis.....	19
Tabelle 4: Werte des M. gastrocnemius lateralis.....	19
Tabelle 5: Werte des M. soleus.....	20
Tabelle 6: Zusammenfassung der p-Werte.....	22

10

15

20

25

## Abkürzungsverzeichnis

	AGBRESA	Artificial Gravity Bed Rest Study (of the European Space Agency)
	ARED	Advanced Resistance Exercise Device
	BDC-8	Baseline data collection (8 days before Bed rest)
5	BMI	Body Mass Index
	DLR	Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum am Standort Köln
	ESA	European Space Agency
	EMG	Elektromyografie
	GM	M. gastrocnemius medialis
10	GL	M. gastrocnemius lateralis
	HDT-BR	Head Down Tilt-Bedrest
	ISS	International Space Station
	LME	Linear Mixed Effects
	MRT	Magnet Resonanz Tomographie
15	MRI	Magnetic Resonance Imaging
	NASA	National Aeronautics and Space Administration
	R+5	Recovery phase (5 days after Bed Rest)
	rpm	revolutions per minute
	SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
20	SOL	M. soleus

## Literaturverzeichnis

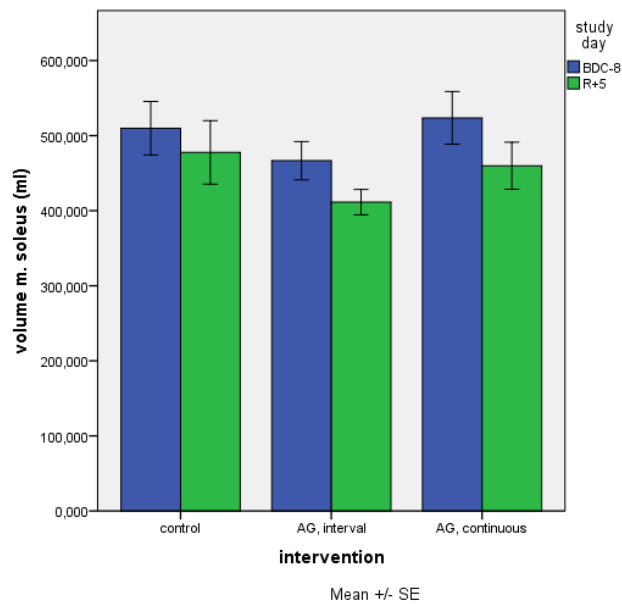
- [1] Barratt MR, Pool SL. Principles of Clinical Medicine for Space Flight. s.l.: Springer-Verlag; 2008
- 5 [2] Pavy-Le Traon A, Heer M, Narici MV, et al. From space to Earth: advances in human physiology from 20 years of bed rest studies (1986-2006). *Eur J Appl Physiol* 2007; 101: 143–194. doi:10.1007/s00421-007-0474-z
- [3] Shackelford LC, LeBlanc AD, Driscoll TB, et al. Resistance exercise as a countermeasure to disuse-induced bone loss. *J Appl Physiol* 2004; 97: 119–129. doi:10.1152/japplphysiol.00741.2003
- 10 [4] Belavý DL, Miokovic T, Ambrecht G, et al. Resistive vibration exercise reduces lower limb muscle atrophy during 56-day bed-rest. *Journal Musculoskelet Neuronal Interact* 2009; 9: 225–235
- [5] Ritzmann R, Freyler K, Krause A, et al. Auswirkung von Schwerelosigkeit auf den menschlichen Bewegungsapparat – Erfolgreiche Maßnahmen gegen Degeneration. *Flug u Reisemed.* 2014; 21: 176–182. doi:10.1055/s-0034-1390227
- 15 [6] Ganse B, Ganse U. Wie man Raumfahrer wird. *Weltraummedizin.* In: Ganse, Ganse (Hg.) 2017 – Das kleine Handbuch für angehende Raumfahrer: 155–239. doi:10.1007/978-3-662-54411-2\_5
- [7] Rittweger J, Bareille M-P, Clément G, et al. Short-arm centrifugation as a partially effective musculoskeletal countermeasure during 5-day head-down tilt bed rest--results from the BRAG1 study. *Eur J Appl Physiol* 2015; 115: 1233–1244. doi:10.1007/s00421-015-3120-1
- 20 [8] DLR - Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin. Zentrifugation – eine vielversprechende Maßnahme gegen Effekte der Langzeit-Bettruhe [AGBRESA-Studie]. Köln; 2018
- 25 [9] Belavý DL, Miokovic T, Ambrecht G, et al. Differential atrophy of the lower-limb musculature during prolonged bed-rest. *Eur J Appl Physiol* 2009; 107: 489–499. doi:10.1007/s00421-009-1136-0
- [10] Götz-Neumann K. Gehen verstehen. Ganganalyse in der Physiotherapie ; 18 Tabellen. *Physiofachbuch.* 2. Aufl. Stuttgart, New York: Thieme; 2006
- 30 [11] H. Lindner. Das Bild der modernen Physik. 4. Aufl. Leipzig: Urania- Verlag Leipzig Jena Berlin; 1973
- [12] Nicogossian AE, Williams RS, Huntoon CL, Doarn CR, Polk JD, Schneider VS. *Space Physiology and Medicine.* New York, NY: Springer New York; 2016. doi:10.1007/978-1-4939-6652-3
- 35 [13] Kuchling H. Physik. Mit 50 Tabellen. Nachschlagebücher für Grundlagenfächer. 16. Aufl. Leipzig: Fachbuchverl.; 1983
- [14] Nicogossian A. Medicine and space exploration. *The Lancet* 2003; 362: 8-9. doi:10.1016/S0140-6736(03)15055-6
- 40 [15] Herrmann M, Engelke K, Ebert R, et al. Interactions between Muscle and Bone-Where Physics Meets Biology. *Biomolecules* 2020; 10. doi:10.3390/biom10030432
- [16] Nachury MV, Mick DU. Establishing and regulating the composition of cilia for signal transduction. *Nat Rev Mol Cell Biol* 2019; 20: 389–405. doi:10.1038/s41580-019-0116-4
- 45 [17] Duncan RL, Turner CH. Mechanotransduction and the functional response of bone to mechanical strain. *Calcif Tissue Int* 1995; 57: 344–358. doi:10.1007/BF00302070
- [18] Fitts RH, Riley DR, Widrick JJ. Functional and structural adaptations of skeletal muscle to microgravity. *J Exp Biol* 2001; 204: 3201–3208
- [19] Fitts RH, Riley DR, Widrick JJ. Physiology of a microgravity environment invited review: microgravity and skeletal muscle. *J Appl Physiol* 2000; 89: 823–839. doi:10.1152/jappl.2000.89.2.823
- 50 [20] Tomilovskaya E, Shigueva T, Sayenko D, et al. Dry Immersion as a Ground-Based Model of Microgravity Physiological Effects. *Front Physiol* 2019; 10: 284. doi:10.3389/fphys.2019.00284



- [21] Narici MV, Kayser B, Barattini P, et al. Changes in electrically evoked skeletal muscle contractions during 17-day spaceflight and bed rest. *Int J Sports Med* 1997; 18 Suppl 4: S290-2. doi:10.1055/s-2007-972729.
- [22] Gruber M, Kramer A, Mulder E, et al. The Importance of Impact Loading and the Stretch Shortening Cycle for Spaceflight Countermeasures. *Front Physiol* 2019; 10: 311. doi:10.3389/fphys.2019.00311
- [23] Timo Frett. DLR-Kurzarm-Zentrifuge. Im Internet: <https://www.dlr.de/content/de/grossforschungsanlagen/dlr-kurzarm-zentrifuge.html>
- [24] Shenkman B. S., Kozlovskaya I.B., Siconofi S.F. et. al. Structure and function of knee extensors after long-duration space flight in man: effects of countermeasures exercise training. Washington, DC; 1997
- [25] LeBlanc A, Lin C, Shackelford L, et al. Muscle volume, MRI relaxation times (T2), and body composition after spaceflight. *J Appl Physiol* 2000; 89: 2158–2164. doi:10.1152/jappl.2000.89.6.2158.
- [26] LeBlanc A, Rowe R, Evans H, et al. Muscle atrophy during long duration bed rest. *Int J Sports Med* 1997; 18 Suppl 4: S283-5. doi:10.1055/s-2007-972726
- [27] Schünke M, Schulte E, Schumacher U. Prometheus. 5. Aufl. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag; 2018
- [28] Ethikkommission - Ärztekammer Nordrhein Düsseldorf. Long-term Bed Rest Study 2019. Artificial Gravity Bed rest study (AGBRESA). 2018143; 2019
- [29] Heuck A, Lütjen-Drecoll E, Rohen JW, Steinborn M. MR-Atlas des muskuloskeletalen Systems. Stuttgart: Schattauer; 2008
- [30] Reinhold Hatzinger, Herbert Nagel. PASW statistics. St - scientific tools. München, Boston: Pearson Studium; 2009
- [31] Piotrowski T, Rittweger J, Zange J. A Comparison of Squatting Exercise on a Centrifuge and With Earth Gravity. *Front Physiol* 2018; 9: 1759. doi:10.3389/fphys.2018.01759
- [32] Rayman RB, Antuñano MJ, Garber MA, et al. Medical guidelines for space passengers--II. *Aviat Space Environ Med* 2002; 73: 1132–1134

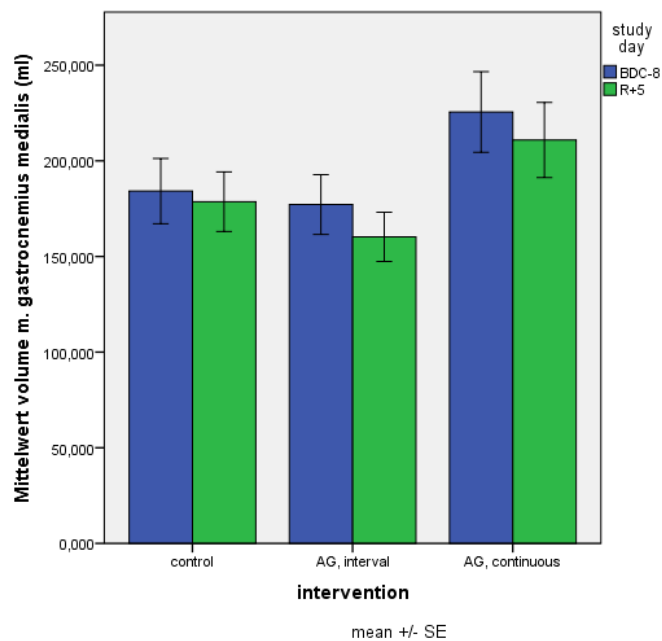
## Anhang

Abbildung 9: Darstellung der Absolutwerte des M. soleus im Balkendiagramm



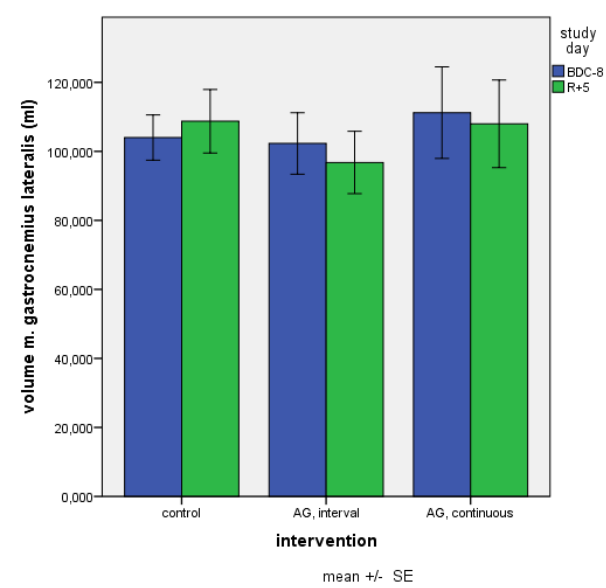
Quelle: Eigene Darstellung mit SPSS

### 5 Abbildung 10: Darstellung der Absolutwerte des M. gastrocnemius medialis im Balkendiagramm



Quelle: Eigene Darstellung mit SPSS

Abbildung 11: Darstellung der Absolutwerte des M. gastrocnemius lateralis im Balkendiagramm



Quelle: Eigene Darstellung mit SPSS

5

10

15

20

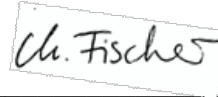
## Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommene Gedanken habe ich als solche kenntlich gemacht.

Fulda, 04.08.2020

---

Ort, Datum



---

Unterschrift